

Kapitel 1

Einleitung

Seit Mitte der 90er Jahre ist in Europa ein deutlicher Trend hin zu klimatisierten Fahrzeugen festzustellen. Die gestiegenen Verkaufszahlen der Klimasysteme im Automobil sind auf ein erhöhtes Komfort- u. Sicherheitsbewusstsein des Verbrauchers zurückzuführen. Diese Entwicklung wurde durch Preissenkungen in den letzten Jahren verstärkt. Heute sind fast 70% der in Deutschland produzierten Neuwagen mit einer Klima-Anlage ausgestattet [60]. Aus diesem Blickwinkel gewinnt die Betrachtung der Umweltverträglichkeit bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung der Klimasysteme stetig an Gewicht.

Verschiedene wissenschaftliche Arbeiten thematisieren die Beeinträchtigung der aktiven Sicherheit aufgrund zu hoher Temperaturen in der Fahrzeugkabine. Wuppertaler Wissenschaftler haben in einer umfassenden Studie festgestellt, dass bei einer Innenraumtemperatur von 27°C die Unfall-Häufigkeit im Ausserortsverkehr 6% bzw. im Innerortsverkehr 11% höher liegt als bei 24°C Kabinentemperatur [2]. Steigt die Temperatur in der Fahrgastzelle auf 37°C, so liegt die Erhöhung der Unfallswahrscheinlichkeit bei 33%. Eine Erhöhung der Kopfraumtemperatur von 25°C auf 35°C führt zu einer Reduktion der Konzentrationsfähigkeit und Ausdauer um 20% [49]. Pfanzeder [44] und Taxis-Reischl [56] haben weitergehende Studien durchgeführt, die nachweisen, dass thermischer Komfort des Fahrers zu einer Steigerung der Konzentrationsfähigkeit führt.

Seit Anfang der dreißiger Jahre des 20. Jahrhunderts wurden in Kälteanlagen hauptsächlich Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW), im Besonderen in der mobilen Kältetechnik R12, als Arbeitsmedium eingesetzt. Das hohe Ozon-Abbau-Potential ($ODP^1=1$) und das beträchtliche Treibhauspotential ($GWP^2=8500$) von R12 führten zum Ersatz durch das Kältemittel R134a. R134a gehört zu der Gruppe der Fluor-Kohlenwasserstoffe (FKW) und besitzt ein ODP von 0 bei einem GWP von 1300. Damit absorbiert R134a mehr als das Tausendfache an Infrarot-Strahlung gegenüber Kohlendioxid und trägt somit zum Treibhauseffekt, d.h. der Erwärmung der Erdatmosphäre bei.

Die 1992 in der UN-Klimarahmenkonvention (Rio de Janeiro) erstmalig festgehaltene Zielsetzung stabiler Treibhausgaskonzentrationen in der Erdatmosphäre, folgten auf der Kyoto-Konferenz 1997 die konkrete Festlegung von Reduktionszahlen des CO₂-Ausstoßes für Staaten und Regionen. Zielsetzung der Industrieländer ist die Reduktion der CO₂-Emissionen

¹Ozon Depleteting Potential

²Global Warming Potential

bis zum Jahr 2012 um 5,2% gegenüber dem Referenzjahr 1990.

Das gesteigerte Verständnis im Bereich der Umweltverträglichkeit ließen bereits Anfang der 90er erkennen, dass R134a lediglich eine Übergangslösung auf dem Weg zu einem umweltverträglichen Kältemittel darstellt. Die natürlichen Kältemittel Propan, Butan und Cyclo-Pentan sind brennbar und werden aufgrund des dadurch vorhandenen Gefahrenpotentials für die Fahrzeuginsassen in der mobilen Kältetechnik kaum eingesetzt. Zu den brennbaren Kältemitteln gehört auch das in der Diskussion befindliche R152a. Das natürliche und in ausreichendem Maß vorkommende Kältemittel CO_2 ist ein potentieller Nachfolger von R134a. Seit 1993 arbeiten Forschungsinstitute und die Automobilindustrie an der Entwicklung der CO_2 -Kälteanlage. Die wesentlichen Schwerpunkte bzw. Ziele sind hierbei Komfortsteigerung, Reduktion des Energieverbrauchs, Leistungsregelung [31], Kostenneutralität zu R134a-Systemen, Steigerung der Systemdichtheit, Schmieröl-Entwicklung [13] und Betriebssicherheit.

Verschiedene Arbeiten [28], [29], [7], [67] haben gezeigt, dass Fahrzeuge die mit einer CO_2 -Kälteanlage ausgestattet sind, die Fahrzeugkabine deutlich schneller abkühlen als herkömmliche Kälteanlagen. Dieser Komfortvorteil ist auf die höhere volumetrische Kälteleistung der Kohlendioxid-Systeme zurückzuführen. Die CO_2 -Kältemaschine ist vor allem im Fahrbetrieb in der Lage höhere Kälteleistungen als herkömmliche R134a-Systeme zur Verfügung zu stellen [28], [29], [7], [67]. Das SAE-Alternate Refrigerant Cooperative Research Programm [48] behandelte den Kraftstoffverbrauch dreier vergleichbarer mobilen Kältesysteme (R134a-Standard, CO_2 -Standard, R134a-Enhanced). Über weite Betriebszustandsbereiche zeigte das Enhanced-R134a-System den geringsten Energieverbrauch dicht gefolgt von dem CO_2 -System.

Der Gesetzesentwurf der EU-Kommission zur Handhabung fluorierter Gase vom Oktober 2004 [45] erlaubt ausschließlich den Einsatz von Kältemittel mit einem GWP kleiner als 150 für neue Fahrzeugtypen bzw. -serien, deren Produktionsbeginn nach dem 1. Januar 2011 liegt. Ab dem 1. Januar 2017 müssen demnach Klimanlagen aller produzierten Neufahrzeuge, auch jene deren Serienproduktionsbeginn vor dem 1. Januar 2011 lag, mit einem Kältemittel ausgestattet sein, dessen GWP kleiner als 150 ist. In einer Übergangszeit, dessen terminlicher Rahmen noch nicht exakt fest liegt, dürfen HFC-134a-Fahrzeugkältekreisläufe eine Kältemittelleckage größer 40 g/Jahr bei 1-Verdampferanlagen bzw. 60 g/Jahr bei 2-Verdampfersystemen nicht überschreiten. Dieser Entwurf betrifft ausschließlich mobile Klimasysteme. Mit der Festlegung, dass der GWP zukünftiger Kältemittel kleiner 150 sein muss, kann neben Kohlendioxid auch R152a Nachfolger von R134a werden. R152a zählt zu den brennbaren und unnatürlichen Arbeitstoffen und stellt im Hinblick des Einsatzes umweltfreundlicher Kältemittel nur eine vorübergehende Lösung dar. Sein Vorteil besteht darin, dass es als mögliches „Drop-In-Kältemittel“ in R134a-Systeme eingesetzt werden kann, und weitere Entwicklungsaufwändungen aufgrund der verwandten Stoffeigenschaften zu HFC-134a relativ gering ausfallen.

Im Hinblick auf den neuen Gesetzesentwurf der EU-Kommission ist der breite Einsatz von Kohlendioxid als umweltfreundliches Kältemittel sehr wahrscheinlich. Im Zusammenhang einer transkritischen CO_2 -Kälteprozessführung ergeben sich für die Systemregelung neue Aufgaben, so z.B. die Regelung des Hochdruckes unter energetischen und leistungsoptimalen Aspekten. Für die Weiterentwicklung der Reglerkonzepte ist eine dynamische Be-

schreibung der Regelstrecke, d.h. des Kälteprozesses unerlässlich. Hier liegt die Motivation dieser Arbeit. Sie befasst sich mit der Beschreibung des transienten Kreislaufverhaltens der CO₂-Kältemaschine für mobile Anwendungen. Bei der Modellierung der einzelnen Komponenten und des Kreislaufs lag der Fokus auf der Anwendung möglichst einfacher Modelle, um das Systemverhalten für langfristig regelungstechnische Anwendungen zugänglich zu machen. Anhand von instationären Messungen wurden die Komponenten- und das vorgestellte Kreislaufmodell verifiziert. Für die Abbildung des thermodynamischen Verhaltens der Expansionsorgane und des Kompressors wurden neuartige empirisch gestützte Kennfeldtypen entwickelt. Mit den vorgestellten Verdichterkennfeldern ist dessen Verhalten auch im abgeregelten Zustand beschreibbar. Weiterführend entstand ein einfaches Modell zur transienten Wiedergabe der Heißgastemperatur des Kompressors. Zur Beschreibung des Niederdruck-Sammlers wurde eigens ein spezieller Modelltyp entwickelt. Dieses Modell wurde mit Messdaten abgeglichen und validiert. Die experimentelle und simulative Charakterisierung des stationären und transienten Sammlerverhaltens stellen den wesentlichen Fortschritt dieser Arbeit gegenüber dem bisherigen Stand des Wissens dar.

Kapitel 2

Stand der Technik

In heutigen Fahrzeug-Klima-Anlagen werden aufgrund der hohen erforderlichen bauraum- und gewichtsspezifischen Leistungsdichten ausschließlich Kompressionskälteanlagen (siehe Abb. 2.1) eingesetzt. Dabei findet überwiegend das Kältemittel R134a Anwendung. Im Folgenden werden die unterschiedlichen R134a-Systeme vorgestellt. Es wird auf die Unterschiede von R134a- und CO₂-Systeme eingegangen und ein Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand von CO₂-Kompressionskälteanlage für mobile Anwendungen gegeben.

2.1 R134a PKW-Kompressionskälteanlagen

Der Kompressionskälteprozess ist durch die Verdampfung und Kondensation des Kältemittels an zwei unterschiedliche Temperatur- und Druckniveaus gebunden. Der R134a-Kälte-Prozess ist in Abb. 2.2 dargestellt. Dem Arbeitsfluid wird Wärme z.B. von der Fahrzeuggabinnen-Luft auf niedrigem Temperaturniveau zugeführt (Zustand 5a, 4b→1). Durch den Siedevorgang wird die latente Wärme aufgenommen bis das Fluid im Zustand 1 in der Gasphase vorliegt. Im Kompressor wird durch die Verdichtung das Kältemittel auf das höhere Druckniveau gebracht wobei Arbeit zugeführt wird (Zustand 1→2). Anschließend wird das heiße unter Hochdruck stehende Gas bis zur Taulinie unter Abgabe sensibler Wärme an die Umgebungsluft abgekühlt. Durch die weitere Wärmeabgabe an die Umgebung tritt bis zur Siedelinie Kondensation auf. Das Kältemittel wird anschließend unter sensibler Wärmeabfuhr in den Zustand 3 der unterkühlten Flüssigkeit überführt. Im Expansionsorgan wird das Arbeitsfluid auf den Verdampfungsdruck gedrosselt (Zustand 5a, 4b).

Heutige Kfz-Kälteanlagen können im Wesentlichen in zwei Kategorien eingeteilt werden. Das sind zum einen Systeme mit Thermostatischem Expansionsorgan und Hochdrucksammler und zum anderen Systeme mit einem Kapillarrohr als Expansionsorgan und einem Sammler im Niederdruckteil. Diese beiden Systemarten und deren Komponenten werden im Folgenden beschrieben (siehe auch [59], [15], [1]).

2.1.1 Kälteanlage mit thermostatischem Expansionsventil

Die Kälteanlage mit thermostatischem Expansionsventil (TXV) wird mit einem Akkumulator betrieben, der auf der Hochdruckseite direkt am Kondensatoraustritt sitzt (siehe Abb.

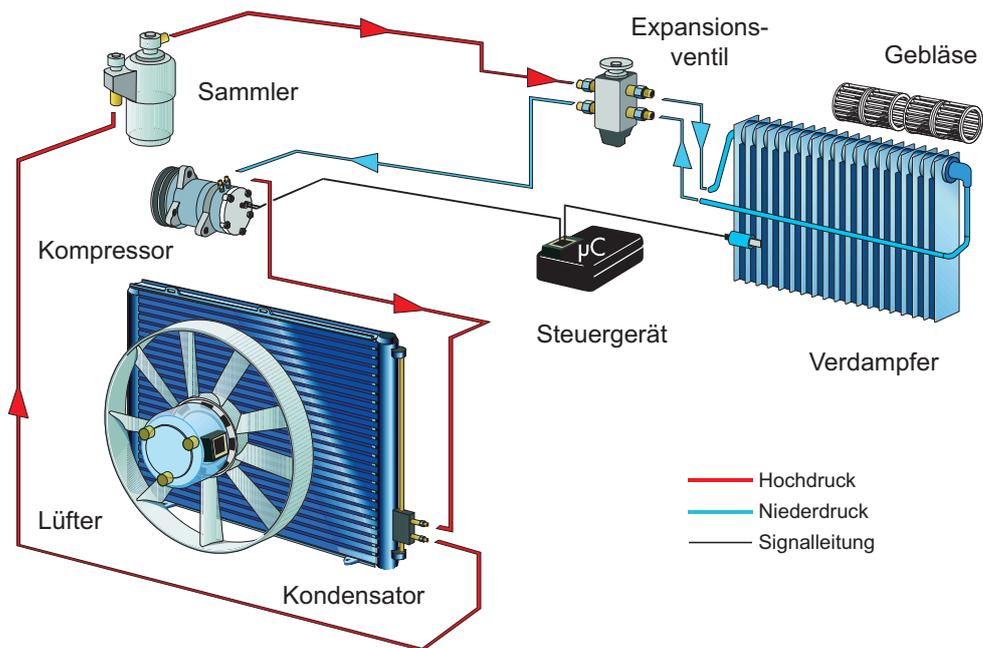
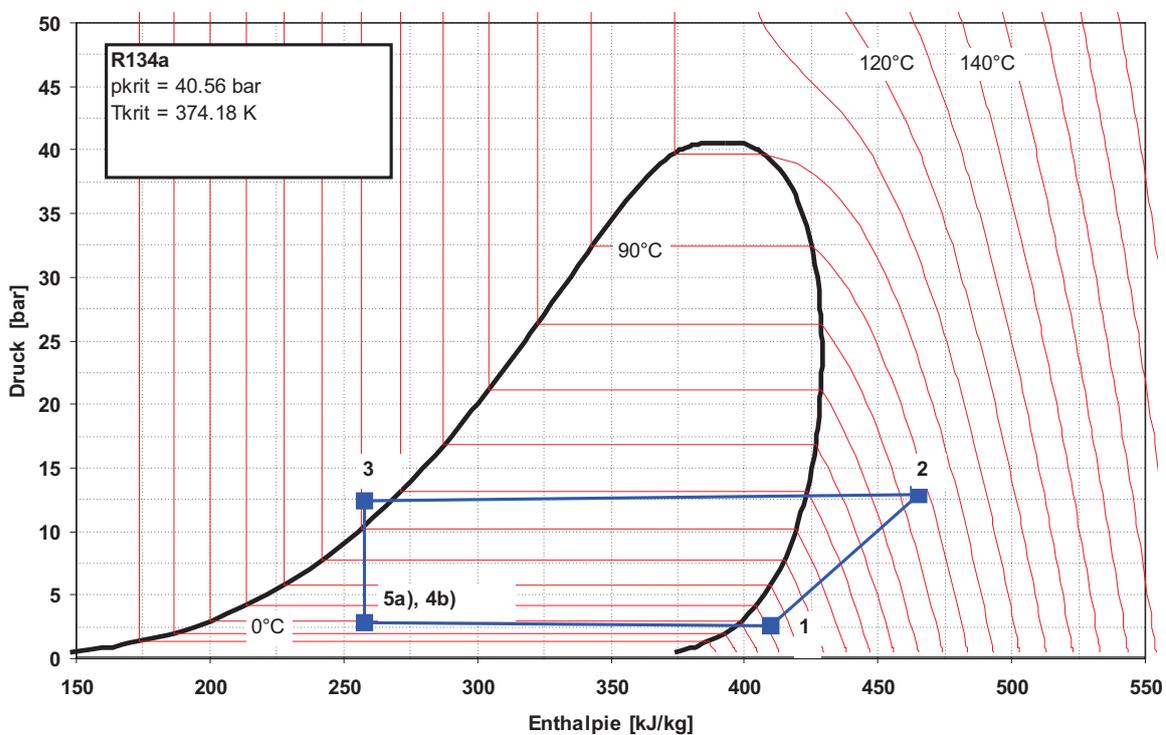


Abbildung 2.1: Aufbau R134a Kältekreislauf.

Abbildung 2.2: Der R134a-Prozess im p,h -Diagramm

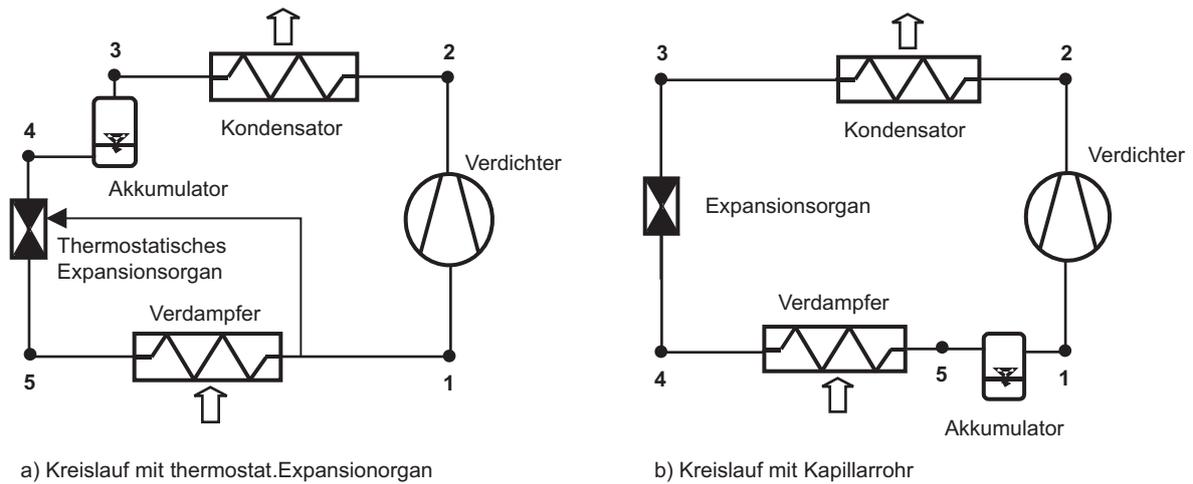


Abbildung 2.3: Aufbau R134a Kältekreislauf Verschaltungsvarianten

2.3 links). Der Sammler puffert Kältemittel um betriebszustandsabhängige Kältemittelverlagerungen zwischen Hochdruck- und Niederdruckteil zu kompensieren. Des Weiteren wird der Akkumulator so dimensioniert, dass der über eine Fahrzeuglebensdauer übliche Kältemittelverlust (durch Leckagen an den Verbindungsstellen, der Verdichterwellendichtung, den Schläuchen, usw.) mit der Erstbefüllung des Systems gespeichert werden kann. Das thermostatische Expansionsorgan sorgt im Idealfall für eine konstante Überhitzung am Verdampferaustritt. Um die optimale Kälteleistung im Verdampfer zu erreichen, wird temperaturabhängig der Kältemittelfluss über das selbsttätig arbeitende Expansionsorgan geregelt. Mittels des R134a-Dampfdruckes und dem Druck in der Membranfüllung, stellt sich unter Berücksichtigung der Federkraft ein Kräftegleichgewicht ein, welches den Hub des Ventils festlegt. Steigt die Temperatur des Kältemittels am Verdampferaustritt an, dehnt sich die Füllung in der Membrane des Thermostatkopfes aus. Dadurch wird der Ventilsitzquerschnitt im Expansionsorgan vergrößert und der Durchfluss des Kältemittels zum Verdampfer steigt an. Durch die konstante Überhitzung wird die Bildung von Flüssigkeitströpfchen am Verdampferaustritt vermieden und es treten keine Flüssigkeitsschläge im Verdichter auf, die sich hinsichtlich Lebensdauer und Geräusentwicklung negativ auswirken.

Im Verdampfer wird dem Kältemittel, das typischerweise bei einem Druck von ca. 2.9 bis 4.1 bar vorliegt, Wärme zugeführt. Dabei wird die Luft, die über den Verdampfer strömt abgekühlt. Die aus dem Verdampfer austretende Luft wird bei Bedarf (z.B. Heizbetrieb im Winter) über den Heizkörper geführt. Sie wird im Heizkörper durch Zufuhr von Abwärme aus dem Kühlkreislauf des Verbrennungsmotors erwärmt. Das Wiederaufheizen der Verdampferluft auf die gewünschte Düsenausblastemperatur im Heizkörper wird „Reheat“ genannt. Durch das gezielte Abkühlen und Aufheizen wird die Luft entfeuchtet. Im Sommerbetrieb (z.B. Kabinenabkühlung) strömt die Luft nicht durch den Heizkörper, sondern wird direkt zu den Ausströmern in der Fahrgastzelle geführt. Das aus dem Verdampfer gasförmig austretende Kältemittel wird im Kompressor auf den lufttemperaturabhängigen Kondensationsdruck (z.B. typischerweise 14 bis 20 bar bei Sommerbetrieb in Europa) verdichtet. Im Kondensator gibt das Kältemittel sensible Wärme (Enthitzungszone und Unterkühlungszone) und latente Wärme (Kondensationszone) an die Luft ab.

Am Kondensatoraustritt ist der Hochdrucksammler angebracht, welcher üblicherweise eine Trocknerpatrone beinhaltet.

2.1.2 Kälteanlage mit Kapillarrohr

Das Kapillarrohr-System (siehe Abb. 2.3 rechts) ist nicht in der Lage, wie das thermostatische Expansionsventil eine konstante Überhitzung am Verdampferaustritt zu gewährleisten. Es können Betriebszustände auftreten, in welchen aus dem Verdampfer Flüssigkeitströpfchen austreten. Diese werden in dem nachgeschalteten Sammler aufgenommen. Der Akkumulator stellt die Phasentrenner-Funktion sicher, so dass am Verdichtereintritt ausschließlich reines gasförmiges Kältemittel anliegt und Flüssigkeitsschläge vermieden werden.

Beim thermostatischen Expansionsorgan wird der Massendurchfluss über den Ventilhub so geregelt, dass sich eine definierte Kältemittelüberhitzung einstellt. Das Kapillarrohr hingegen ist ein passives Element, in welchem die betriebspunkteabhängige Lage des Bläschenpunktes den Massendurchsatz bestimmt. In das Kapillarrohr strömt unterkühlte Flüssigkeit ein. Diese wird durch den engen Querschnitt im Expansionsorgan beschleunigt und der Druck nimmt ab (Umwandlung Druckenergie in kinetische Energie). Nach einer gewissen zurückgelegten Lauflänge in der Kapillare schlägt die Flüssigkeit in ein Gas/Flüssigkeitsgemisch um (Bläschenpunkt). Ab diesem Punkt treten die größten Druckverluste im Kapillarrohr auf. Je näher der Bläschenpunkt am Austritt der Kapillare liegt, umso geringer ist der Strömungswiderstand, und desto größer ist der Massenstrom, der durch das Expansionsorgan fließt. Tritt die Flüssigkeit mit sehr geringer Unterkühlung in das Expansionsorgan ein, liegt der Bläschenpunkt näher am Eintritt und der Massenstrom ist dementsprechend gering.

Dieses System hat einen selbstregelnden Charakter. Wird beispielsweise der Luftdurchsatz am Verdampfer erhöht, so steigt die Luftausblasttemperatur und der Saugdruck an, und es liegt am Kompressorsaugstutzen Kältemittel höherer Dichte vor. Der Verdichter fördert dadurch einen höheren Massenstrom. Dies hat eine Erhöhung des Kondensationsdruckes zur Folge. Durch den höheren Kondensationsdruck und die damit einhergehende Erhöhung der Unterkühlung wandert der Bläschenpunkt im Kapillarrohr zum Austritt (Verminderung des Strömungswiderstandes). Damit einher geht eine Erhöhung des Kältemittelmassenstroms. Im Verdampfer muss anschließend die höhere Kältemittelmenge verdampft werden und es kommt hierdurch zum Absinken der Luftaustrittstemperatur. Dieser selbstregelnde Effekt (zu Beginn trat ein Luftausblasttemperatur-Anstieg auf) stellt über weite Zustandsbereiche die Unterkühlung nach Kondensator sicher. Unterschreitet die Lufttemperatur am Verdampfer den Gefrierpunkt, so bildet sich im Feucht-Luft-Betrieb Eis im Verdampfer. Das luftseitige Verdampfer-Netz gefriert langsam zu, bis kein Luftdurchsatz mehr vorhanden ist. Dieser Zustand führt durch die Ausdehnung des Wassers während des Phasenwechsels zur Beschädigung des Verdampfers und ist im Betrieb zu vermeiden. Nimmt die Luftaustrittstemperatur Werte nahe der 0°C-Marke an, so detektiert ein Lufttemperatursensor diesen Zustand. Die Kältekreislaufregelung reduziert in diesen Fällen den effektiv geförderten Verdichtervolumenstrom durch Hubreduktion oder Taktbetrieb. Ein Vorteil des Kapillarrohr-Systems ist der einfache und leichte Aufbau des Expansionsorganes.

2.1.3 R134a-Wärmeübertrager

2.1.3.1 Kondensator

Heutige Kondensatoren sind aus parallel angeströmten Flachrohren (Kältemittelseite) aufgebaut. Die Luftseite wird über Rippen im reinen Kreuzstrom zum Kältemittel geführt. Die Wärmeübertrager bestehen aus Aluminium und werden mittels Löttechnik gefertigt. Die früher gefertigten Kondensatoren bestanden überwiegend aus Rundrohren, welche mittels mechanischer Fügung mit den Luftrippen verbunden wurden. Typische Stirnflächen auf der Luftseite sind für Kleinwagen 13 bis 21 dm² während bei Oberklasse-Fahrzeugen typische Anwendungen bei 25 bis 30 dm² liegen. Die Tiefe der Systeme in Luftrichtung beträgt üblicherweise 16 bis 20 mm. Zur Steigerung des Luftmassenstroms werden vor allem bei niedrigen Fahrtgeschwindigkeiten Gebläse eingesetzt.

Die luftseitige Durchströmung des Vorderwagens im Motorraum ist abhängig von den Einbauten vor und nach Kondensator (z.B. vor Kondensator: Lenkhilfekühler, Hupe, Elektronikbausteine; nach Kondensator: Motorisierungsvarianten). Abhängig von der Kondensatordurchströmung ergeben sich unterschiedlich warme Zonen im Wärmeübertrager. Über die Art der Verschaltung der Flachrohre in den Umlenkkästen kann dieses Bauprinzip gut an die örtlich unterschiedlich temperierten Zonen angepasst werden, um so eine höchstmögliche wärmetechnische Effizienz zu ermöglichen. Des Weiteren bietet diese Bauform ein hohes Mass an Flexibilität hinsichtlich der Anschlussbedingungen (örtliche Lage der Ein- und Austritte).

In vielen Fahrzeugen werden heutzutage auch sogenannte Kondensator-Module (KOMO) eingesetzt (siehe Abb. 2.4). Diese Module vereinigen die Funktionen des Kondensators und Sammlers in einem Bauteil. An der Seite des Wärmeübertragernetzes befindet sich ein senkrecht stehendes Rundrohr, welches als Flüssigkeitssammler dient und eine Trocknerpatrone enthält. Das Kältemittel tritt aus dem Wärmeübertragernetz aus und separiert sich im Sammler in eine flüssige und ein gasförmige Phase. Unten strömt aus dem Sammler flüssiges R134a in den Unterkühlteil des Wärmeübertragernetzes (örtlich unten angeordnet), bevor es aus dem Kondensator-Modul austritt. Die KOMO-Bauform stellt durch die eingebaute Unterkühlstrecke eine über weite Zustandsbereiche definierte Unterkühlung sicher. Verglichen mit einem typischen Kondensator ermöglicht das Kondensatormodul geringfügig höhere Verdampferleistungen bei gleicher Kompressorleistungsaufnahme. Weitere Vorteile der KOMO-Bauform sind die geringere benötigte Kältemittelmenge sowie die Reduktion der Verbindungsstellen (Effekt: Leckageverluste). Aus Umweltgesichtspunkten betrachtet ist somit das KOMO-System einem konventionellen Kondensator vorzuziehen.

2.1.3.2 Verdampfer

Der Verdampfer sitzt im Klimagerät unter dem Armaturenbrett in der Fahrgastzelle. Seine Aufgabe besteht in der Abkühlung und Entfeuchtung der eintretenden Frischluft. Unterschreitet die Wandtemperatur die Taupunkttemperatur der Luft so fällt Kondensat im Verdampfer an. Das Kondensat wird vom Verdampfer abgeleitet. Dabei kann eine hydrophile Beschichtung das Wasser-Ablauf-Verhalten verbessern. Die aus dem Verdampfer austretende abgekühlte und entfeuchtete Luft wird im Klimagerät anschließend optional über den Kühlmittel-Heizkörper (Erwärmung der Luft) oder direkt zu den Ausblasdüsen (z.B. Fußraum-, Mittel-, Seiten- und Defrostdüsen) geführt. Typische Abmaße heutiger in



Abbildung 2.4: Aufbau R134a-Kondensator-Modul.

Produktion befindlicher Systeme sind luftseitige Querschnittsflächen von 3.5 bis 5 dm² in Kleinfahrzeugen während im Oberklasse-Segment 5.5 bis 7.5 dm² vorzufinden sind. Die Systemtiefen in Luftrichtung liegen üblicherweise bei 50 bis 65 mm.

In heutigen Fahrzeugen werden überwiegend Scheibenverdampfer und zunehmend auch Flachrohrverdampfer eingesetzt (siehe Abb. 2.5). Das Kältemittel strömt jeweils zwischen zwei Platten. Die Plattenpaare sind durch Luftrippen getrennt. Bezüglich der Stromführung wird das Kältemittel hauptsächlich im Kreuzstrom zur Luft geführt. Die mit oben- und untenliegenden Umlenkkästen ausgeführten Scheibenverdampfer, auch 2-Tank-Verdampfer genannt, ermöglichen ein über den Ort betrachtetes homogeneres Temperaturprofil als die gewöhnlichen 1-Tank-Scheibenverdampfer. Die Luftführung im Klimagerät muss auf das Luftaustrittstemperaturprofil des jeweilig eingesetzten Verdampfers abgestimmt sein, um an den verschiedenen Düsen eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu erzielen. Eine grundsätzliche Neuentwicklung, welche in immer mehr Fahrzeugtypen eingesetzt wird, stellt der Flachrohrverdampfer dar. Dabei strömt das Kältemittel in senkrecht stehenden Flachrohren, welche durch Luftrippen getrennt sind. Seine Vorteile sind im Wesentlichen die volumenspezifische höhere Kälteleistung, homogeneres Temperaturaustrittsprofil und ein erhöhtes Maß an Flexibilität hinsichtlich der Strömungsführung und der Lage der Anschlussrohre (Einbausituation).

In Orifice-Systemen treten Betriebspunkte (hauptsächlich im Schwachlastbereich) auf, in welchen am Verdampferaustritt Nassdampf vorliegt (überfluteter Verdampfer). Je geringer der Dampfgehalt am Verdampferaustritt ist, umso geringer ist die Strömungsgeschwindigkeit des Kältemittels. In diesen Fällen kann es dazu kommen, dass das Kältemittelöl nicht mehr mittransportiert wird, und sich in tiefer liegenden Anlagenteilen sogenannte ölfreiche Flüssigkeitssäcke bilden. Diesem Phänomen ist hinsichtlich der Systemgestaltung Rechnung zu tragen. In Kälteanlagen mit thermostatischem Expansionsventil liegt am Verdampferaustritt eine reine Gasströmung vor. Diese führt zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten und gewährleistet damit den Transport des Schmieröls.